

УДК 622.24.051.004.6

Є.І. Крижанівський д-р техн.наук, Р.С. Яким канд.техн.наук, Л.Є. Шмандровський,  
Ю.Д. Петрина д-р техн.наук  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м.Івано-Франківськ, Україна

## КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТАКТНОЇ ТРИВКОСТІ ОПОР КОЧЕННЯ ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ

*Повышение качества конструкторских показателей поверхности цапф лап за счет точения в конечный размер перед химико-термической обработкой понижает эффект деформирования беговых дорожек в процессе термообработки, что позволяет отказаться от окончательных шлифовальных операций. Обработка точением в конечный размер перед цементацией по сравнению со шлифованными цапфами после термообработки обеспечивает высокую стабильность по глубине цементированного шара, меньшее рассеивание поверхностной твердости, а также формирует лучший градиент распределения концентрации углерода по глубине. Опоры качения трехшарошечных буровых долот, у которых цапфы лап обработаны точением в конечный размер, показали приблизительно в 1,5 раз высокую контактную выносливость по сравнению со шлифованными после термообработки.*

*Quality increase of design indices of the arm pin surfaces at the expense of the turning into the final size before chemical and heat treatment lowers the races deformation effect in the process of heat treatment. At allows to refuse the finish grinding operations. The twening into the final size before the cementation in the comparison with the grinded pins after the heat treatment provides higher stability depthward of the cemented layer, less scattering of the surface hardness, and also forms better distribution gradient of the carbon concentration depthward. Three-cone rock bits rolling contact bearings with the arm pins treated by the turning into the final size showed half as higher contact endurance as the grinded ones after heat treatment*

Практика відробки тришарошкових бурових доліт з підшипниками кочення показує, що значна їхня частина виходить з ладу через заклинювання опори. Це явище призводить до ускладнень процесу буріння, створює аварійні ситуації, підвищує ціну метра проходки на долото, що веде до прямих збитків. Однією з причин заклинювання є недостатня стійкість цапфи лапи до контактної руйнування. Тому дослідження шляхів забезпечення контактної тривкості цапф лап є актуальним народногосподарським завданням.

Забезпечення контактної тривкості цапф лап, особливо відкритих конструкцій опор бурових шарошкових доліт, можливе за рахунок оптимального вибору вихідних властивостей матеріалів та конструктивних параметрів, що задаються на стадії проектування та конструювання, а також технологічних чинників, які формуються на стадіях проектування і реалізації технологічних процесів виготовлення [1].

Цапфи лап виготовляються зі сталей 19ХГНМА, 21ХГНМА, 22ХГНМА, які піддаються цементації, і контактне руйнування опор кочення може розвиватися за двома схемами [2, 3]. В одному випадку виникає підповерхнева тріщина, зумовлена перепадом залишкових напружень в ділянці переходу „зміцнений шар-серцевина”. У другому випадку фізико-механічні та конструкторські (шорсткість, однорідність товщини цементованого шару) параметри можуть сприяти виникненню поверхневих тріщиноподібних дефектів під дією значних контактних напружень в опорі та дії зовнішнього агресивного середовища. З огляду на це, а також, враховуючи складні умови, в яких працюють деталі опор доліт [4], та різну точку зору дослідників на вирішальний чинник у забезпеченні контактної тривкості опор кочення в розв’язанні окресленої проблеми сформувалися різні підходи, серед них найбільш вагомі освітлені в [4 - 8] та ін.

Якість структури цементованого шару, а саме рівномірність розподілу цементиту не вище 3 балу, а також оптимальний градієнт твердості в напрямку від поверхні до серцевини робочих поверхонь [4]

забезпечує високу стійкість до руйнування опор бурових доліт. Також встановлено позитивний вплив на довговічність опор виконання попереднього термомеханічного оброблення заготовок цапф лап [5]. Однак проблема забезпечення стабільності в роботі опор шарошкових доліт залишається ще не вирішеною.

З метою кардинального покращення контактної тривкості опор в [6] запропоновані рекомендації з розробки і використання комплексно легованих сталей, що забезпечують високу стабільність фізико-механічних властивостей під дією робочих температур. Однак такі сталі є досить дорогими і не знайшли застосування в долотобудуванні. Необхідно зауважити, що подолання проблеми виникнення критичних температурних спалахів у ділянці контакту можливе не тільки за рахунок впровадження досягнень сучасного металознавства, а й пошуком шляхів забезпечення оптимального напруження в зоні контакту при терті кочення, усунення чи послаблення чинників, що спричиняють проковзування [9, 10]. Відомо, що на проковзування суттєво впливають конструкторські показники поверхні. Зокрема, шорсткість, хвилястість поверхні, відхилення від циліндричності контактуючих поверхонь зумовлюють негативні процеси в зоні контакту, які призводять до руйнувань цементованого шару [11]. Оскільки після цементації цапфи лап бурових доліт піддаються шліфуванню, то проблема контактної тривкості ускладнюється негативним технологічним спадком. Значна шорсткість вихідної поверхні посилює теплові процеси при мікрорізанні і підвищує неоднорідність напруженого стану поверхні після шліфування. У випадку оброблення шорстких чи хвилястих вихідних поверхонь різко збільшується ймовірність отримання припалів та нерівномірної чистоти поверхні [3]. Також під час шліфування копіюється відхилення від форми, які були отримані на попередніх операціях оброблення деталей. У процесі термообробки цапфи лап зазнають деформації і в результаті шліфування знімається неоднорідний поверхневий шар. В окремих випадках має місце значне знімання цементованого шару, що формує його неоднорідність по товщині.

Відомий досвід виготовлення лап з сталі типу 20ХГНМА, яка забезпечує низьку схильність деталей до деформації, викривлення [7, 8]. Це дозволяє проводити шліфування перед термообробкою. Після термообробки проводиться електрополірування з зняттям поверхневого шару до 0,4 мм, що дозволяє суттєво підвищити працездатність опор. Проте дана технологія не знайшла застосування у вітчизняному долотобудуванні в силу об'єктивних конструкторсько-технологічних і економічних причин.

Сьогодні, з впровадженням у виробництво високоефективного токарного обладнання з ЧПК, відкрилися можливості проводити точіння, що забезпечує необхідну конструкторську точність і усуває потребу в кінцевому шліфуванні. Це показало значний ефект при обробленні шарошок бурових доліт [12]. Відтак, гіпотезою дослідження є твердження про те, що виконання точіння на високоефективному токарному верстаті з ЧПК формує не тільки кращі конструкторські показники поверхонь цапфи, а й сприятливий технологічний спадок, що дозволяє після хіміко-термічного оброблення (ХТО) не проводити викінчувальне механічне оброблення, при цьому повинна забезпечуватись ефективна контактна тривкість опор кочення шарошкового долота.

Тому було поставлено задачу – порівняти конструкторські показники поверхонь, фізико-механічні показники зміцнених шарів цапф, а також стійкість цапф лап до контактного руйнування. Ці конструктивні елементи виготовлені згідно існуючої технології (токарне оброблення, ХТО, шліфування) та експериментальним способом – точіння в кінцевий розмір до ХТО.

З цієї метою на ВАТ „Дрогобицький долотний завод” було виготовлено партію експериментальних лап зі сталі 19ХГНМА-В (з цієї сталі виготовляють серійні лапи) для тришарошкових бурових доліт 244,5 ОК-ПГВ Д26 У. Оброблення цапфи лапи проводили на токарному верстаті з ЧПК моделі TV650/4 фірми „DANOBAT” (Іспанія), що дозволяє з одного установу виконувати все механічне оброблення цапфи лапи. Профілограми шорсткості отримували на профіломірі HOMVEL TESTER T1000. ХТО обох порівнювальних партій лап здійснювали у відповідності до відпрацьованої технології в печах Ipsen – Carb-o-Prof – III, що передбачають комп'ютеризований контроль і керування технологічним процесом. Концентрацію вуглецю в шарах цементованих зразків визначали згідно стандартної методики за допомогою аналізатора АН-7529. За глибину цементованого шару приймали

заевтектоїдну, евтектоїдну і половину перехідної зони „цементований шар – серцевина”. Твердість вимірювали за стандартною методикою на темплетях з досліджуваних цапф лап за допомогою ПМТ-3.

Для встановлення контактної тривкості порівнюваних цап лап проводили випробовування комплектів долота на стенді для випробовування доліт (СВД) ВАТ “ДДЗ”. Механізм обертання шарошок в контакт з металевим вибоєм (сталь 20) здійснювали при частоті обертання стола з вибоєм 100 об/хв, осьовому навантаженні на комплекти 60-70 кН. Припрацювання комплектів проводилось протягом 1 год при навантаженні 10-12 кН. Після цього поступово протягом 1 год збільшували навантаження на комплекти до 30-32 кН. Далі протягом 15 хв. навантаження на комплекти поступово збільшували до 60-70 кН. Перед випробовуванням опори комплектів заповнювали мастилом „Долотол - Н”. На стенді опори відпрацьовували з охолодженням технічною водою. Кожних 10 год комплекти розбирали і здійснювали оцінку зносу опорних поверхонь. Випробовування було припинено у зв'язку з підклинюванням серійного комплекту.

Оскільки бігові доріжки великого роликового підшипника кочення сприймають найбільше навантаження в опорі, то для порівняння їх шорсткості для досліджуваних варіантів оброблення приведемо профілограми (рис. 1).

Отримані результати вказують на те, що на відміну від серійної технології механічного оброблення точінням на верстаті з ЧПК забезпечує кращу шорсткість отримуваних поверхонь. Також тут забезпечується вища стабільність отримання заданої шорсткості та немає навіть незначного відхилення від циліндричності та круглості (в серійних цапфах після кінцевого оброблення відхилення розмірів можуть складати 0,01-0,03 мм), що можна зафіксувати в заводських умовах. Отже, отримувані конструкторські параметри на експериментальних цапфах лап дозволяють прогнозувати їх вищу контактну тривкість.

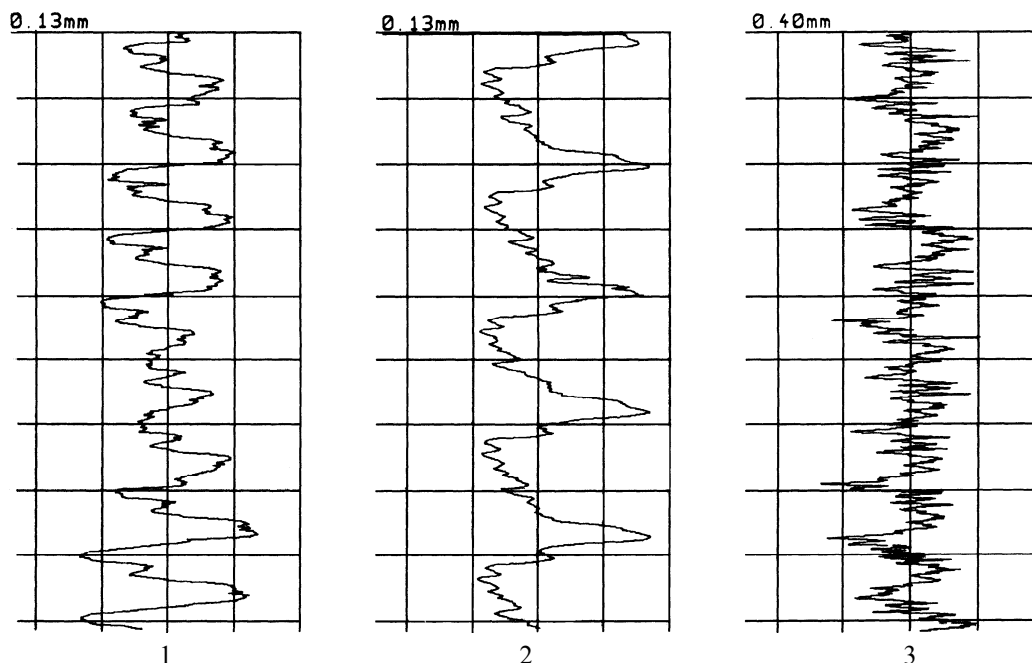
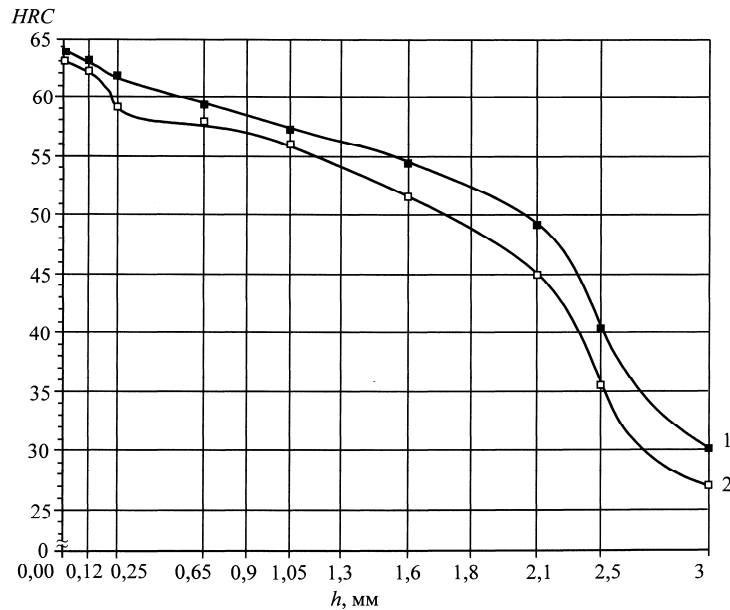


Рис. 1. Порівняння профілограм поверхонь великої роликової бігової доріжки (ВРД) цапф лап, оброблених згідно серійної технології (1, 2) і експериментальної (3): 1 – верхня частина ВРД,  $R_a=0,482$  мкм; 2 – нижня частина ВРД,  $R_a=1,095$  мкм; 3 – типова для всієї поверхні ВРД  $R_a=0,339$  мкм

Результати замірів твердості по глибині зміцнених шарів на темплетях з цапф лап приведено на рис. 2. З отриманих даних видно, що в приповерхневих шарах цементованого шару експериментальної цапфи не спостерігається різкого падіння твердості, як це зафіксовано в серійній цапфі. Крім цього, більші значення твердості в експериментальній цапфі забезпечуються тим, що не відбувається зрізання цементованого шару, як у серійній цапфі. Вимірювання поверхневої твердості на бігових доріжках показало вищу стабільність у експериментальній цапфи, де твердість становила HRC 63 – 64. У серійній

поверхнева твердість мала більше поле розмаху HRC 61 – 64, що свідчить про негативний технологічний спадок від шліфування.



**Рис. 2. Порівняння розподілу твердості в поверхневих шарах на ВБД у досліджуваних цапфах лап:**

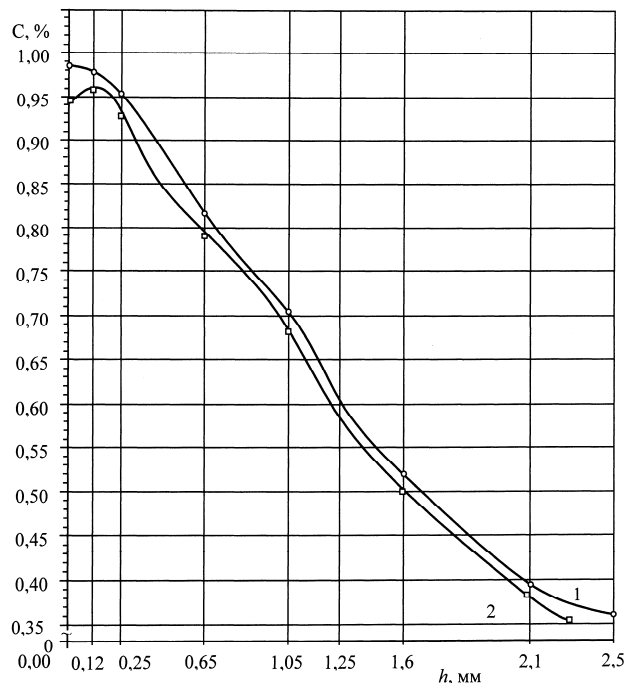
1 – оброблення точінням в кінцевий розмір до ХТО – товщина цементованого шару 2,3 мм; 2 – оброблення шліфуванням після ХТО – товщина цементованого шару 1,8 – 2 мм

Проте помічена схильність до деформування бігових доріжок, наприклад, відхилення від циліндричності може досягати більше 0,025 мм, що недопустимо згідно нормативної документації. Необхідно зауважити, що значна неоднорідність конструкторських параметрів сформована на етапі механічного оброблення суттєво посилює цей ефект. Відтак, при викінчувальних шліфувальних операціях відбувається інтенсивне неоднорідне зняття цементованого шару, що веде не тільки до зміни параметрів поверхневого шару, але й призводить до утворення неоднорідності по глибині цементованого шару (рис. 3). Це відповідно негативно впливає на контактну тривкість цементованих поверхонь опор кочення.

У результаті проведених стендових випробовувань встановлено, що на поверхнях

Аналіз розподілу концентрації вуглецю в цементованому шарі порівнюваних цапф лап також виявив суттєві відмінності (рис. 3). Так, в експериментальних цапфах виявлено плавний спад концентрації вуглецю від поверхні до серцевини. Для поверхневих цементованих шарів серійних цапф характерним є зниження концентрації і на глибині порядку 0,12 мм є пік зростання на 0,03-0,06 %C, після чого концентрація стрімко спадає.

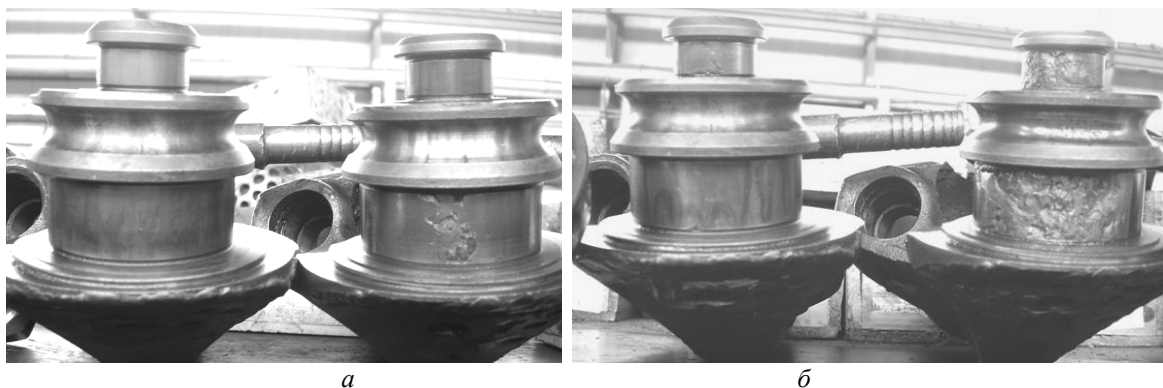
Відомо, що вуглець по-різному впливає на контактну тривкість цементованого шару. Максимум контактна тривкість досягає поблизу евтектоїдного вмісту вуглецю [13] (в шарі з концентрацією вуглецю 0,55...1,1 % глибиною 1,8 мм евтектоїдний вміст вуглецю складає 0,62 %).



**Рис. 3. Порівняння розподілу процентного вмісту вуглецю в поверхневих шарах ВБД досліджуваних цапф лап:** 1 – оброблення точінням в кінцевий розмір до ХТО – товщина цементованого шару 2,3 мм; 2 – оброблення шліфуванням після ХТО – товщина цементованого шару 1,8 – 2 мм

бігових доріжок шліфованих цапф лап вже на 15-тій годині утворюються помітні контактні руйнування у вигляді піттингів, локального відшарування цементованого шару, тріщини. На 20-ій годині руйнування шліфованої цапфи стають значними і, знаходячись у найбільш навантаженій ділянці роликів бігової доріжки, утворюють суцільну зону контактної руйнування цементованого шару (рис. 4, а). При цьому на цапфах, які пройшли токарне оброблення в кінцевий розмір до ХТО, подібні руйнування спостерігали на 30-тій годині відробки. На 46 годині відробки цапфа експериментальної лапи мала хіба що значні контактні руйнування малої роликів бігової доріжки. При цьому на кульковій та великій роликів доріжках катастрофічного контактної руйнування, яке було зафіксовано на серійній цапфі, не виявлено (рис. 4, б). У загальному, серійна цапфа в навантаженій зоні отримала суцільне катастрофічне контактне руйнування на великій та малій роликів бігових доріжках. Отже, проведені випробовування показали, що експериментальний комплект оброблений точним точінням в кінцевий розмір на верстаті „DANOBAT” перед ХТО показав приблизно в 1,5 разів вищу стійкість до утворення контактних руйнувань у порівнянні з серійним комплектом, який був шліфований після ХТО.

Отже, підвищення якості конструкторських показників поверхні цапф лап за рахунок точного точіння в кінцевий розмір перед хіміко-термічним обробленням знижує ефект деформування бігових доріжок під час термообробки, що дозволяє відмовитись від викінчувальних шліфувальних операцій. Оброблення точінням в кінцевий розмір перед термообробкою у порівнянні з шліфованими цапфами після термообробки забезпечує вищу стабільність по глибині цементованого шару, менше розсіювання поверхневої твердості, а також формує кращий градієнт розподілу концентрації вуглецю по глибині. Опори кочення тришарошкових бурових доліт, у яких цапфи лап оброблені точінням в кінцевий розмір, виявили приблизно в 1,5 разів вищу контактну тривкість у порівнянні з шліфованими після термообробки.



**Рис. 4.** Загальний вигляд цапф серійної (зліва) і експериментальної (справа) лапи тришарошкових бурових доліт 244,5 ОК-ПГВ-Д26 після відпрацювання на стенді: а – цапфи після 20 год, б – цапфи після 46 год.

Впровадження оброблення з одного установу цапфи лапи на токарному верстаті з ЧПК моделі TV650/4 фірми „DANOBAT” (Іспанія) дозволяє не тільки підвищити точність конструкторських параметрів поверхні, але й зменшити час на механічне оброблення цапфи. Зокрема, при базовому механічному обробленні в центрах з застосуванням кінцевого шліфування сумарна норма часу становила 2,16 год при сумарній оплаті праці основних робітників, що виконують операції мехобробки, 14,17 грн. Апробація та впровадження автоматизованого безцентрового точного точіння цапфи лапи дозволило встановити норму часу на обробку 1,35 год і сумарну ціну операцій 9,04 грн. Отже впровадження дозволяє скоротити час оброблення однієї лапи на 41 хв, при цьому забезпечується зменшення ціни мехобробки на 5,13 грн (станом на розцінки операцій до жовтня 2009 р.).

На далі перспективним є дослідження шляхів підвищення довговічності опор ковзання шарошкових бурових доліт.

## Список літератури

1. Теоретичні основи обґрунтованого вибору критеріїв відмов і шляхів підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт / Є. І. Крижанівський, Р. С. Яким, Л. Є. Шмандровський, Ю. Д. Петрина // Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Машинобудування. – К.: КТУУ „КПІ”. – 2009. – Вип. 56. – С. 6 – 13.
2. Петрусевич А. И. Контактная прочность деталей машин / Петрусевич А. И. – М.: Машиностроение, 1970. – 64 с.
3. Влияние внешних факторов на контактную прочность при качении / [Пинегин С. В., Шевелев И. А., Гудченко В. М. и др.] – М.: Машиностроение, 1972. – 100 с.
4. Аналіз працездатності опор Р-К-Р тришарошкових бурових доліт / Є. І. Крижанівський, Р. С. Яким, Л. Є. Шмандровський, Ю. Д. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 2 (27). – С.25 – 34.
5. Вплив технологічного спадку на стійкість шарошкових бурових доліт / Є. І. Крижанівський, Р. С. Яким, Л. Є. Шмандровський, Ю. Д. Петрина // Машинознавство. – 2008. – № 5. – С.12–17.
6. Долговечность шарошечных долот. / [Н. А. Жидовцев, В. Я. Кершенбаум, Э. С. Гинзбург и др.] – М.: Недра, 1992. – 272 с.
7. Dill H. C. Carburizing components for rock-bits in a continuous furnace / H. C. Dill. // Metal Progr. – 1972. – №3 (102). – p.84 – 85.
8. Буровой породоразрушающий инструмент: Международная инженерная энциклопедия. (Международный транслятор-справочник) – Т.1: Шарошечные долота. / [Под науч. ред. В. Я. Кершенбаума, А. В. Торгашова, А. Г. Мессера] – М.: Нефть и газ, 2003. – 257 с. (Серия „Нефтегазовая техника и технология”. т. 1).
9. Надежность и долговечность машин / [Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Бершадский Л. И., Караулов А. К.] – К.: Техніка, 1975. – 408 с. (Серия „Библиотека инженера”).
10. Трение, изнашивание и смазка: справочник в 2 кн. / [ред. Крагельский И. В., Алисин В. В.] – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.
11. Пинегин С. В. Трение качения в машинах и приборах / Пинегин С. В. – М.: Машиностроение, 1976. – 264с.
12. Яким Р. С. Технологічне забезпечення стійкості тришарошкових бурових доліт / Яким Р.С., Петрина Ю.Д., Пасинович Т.Б. // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Вип. 38. – С. 263 – 267.
13. Влияние углерода на контактную выносливость цементируемой и высокоуглеродистой сталей /Б.Б.Винокур, Р.А.Кондратюк, Р.А.Хруник [и др.]. // Физико-химическая механика материалов. – 1986. – № 2. – С.96–98.